

文章编号: 1000-7598-(2004)11-1761-05

新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究

王银梅^{1,2}, 韩文峰^{1,3}, 谌文武¹

(1.兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2.太原理工大学, 山西 太原 030024; 3.天津城建学院, 天津 300384)

摘要: 高分子材料具有传统固化材料所没有的优越性质, 其在土加固方面的发展前途远大。利用新型生态环境型高分子材料 SH, 对我国广泛分布且具有特殊工程性质的黄土进行加固。试验结果表明, 用 SH 固化黄土力学性能好, 表现为强度高、耐低温、能抗水。与工程上已应用的水泥黄土进行对比分析, 认为 SH 用量少, 价格便宜, 固化效果优良, 是一种比较理想的高分子黄土加固材料。

关键词: 新材料; 高分子固化材料; 黄土加固; 强度; 水泥黄土

中图分类号: TU 449

文献标识码: A

Research on comparison between mechanical behaviors of loess solidified with new polymer material and cement

WANG Yin-mei^{1,2}, HAN Wen-fen^{1,3}, CHEN Wen-wu¹

(1.School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030024, China; 3.Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: It has been noticed that polymeric solidified materials have perfect properties than the traditional ones, so they will have wide prospect. In this paper, an experimental research on the loess, which has wide distribution and special engineering properties, solidified by using the new ecomaterial of SH. The result of the mechanical behavior of loess solidified with SH is clear: the high compressive strength, the good endurance of low temperature and water. Loess-cement has been used in engineering. A comparison between loess solidified with SH and loess-cement is made. Finally, it is concluded that SH is less dosage, cheap price and good solidified effect on loess. SH is an ideal polymeric loess solidified material.

Key words: new materials; polymeric solidified material; loess solidification; strength; loess-cement

1 前言

黄土在我国分布广、厚度大, 具有湿陷性、分散性、高压缩性及低强度等不良的工程性质。未经处理的上述软弱黄土一般不能作为土建构筑物, 如地基、路基持力层, 隧道的周围介质等。从工程地质学角度看, 对于黄土的处理可采用各种方法进行加固, 改善其工程性质。就本质来说, 它们可分为机械及化学加固两大类。若不进行换填和预压固结, 则注浆固化和喷粉固化的较好的处理方法。对于一些特殊工程, 有时是不能用换填和预压固结来处理黄土层的, 则化学固化成为处理的首选方法^[1]。化

学固化材料主要有硅酸钠(又称水玻璃)、氯化钙、氢氧化钠、铝酸钠、丙烯酰胺、铬木素纸浆废液以及水泥浆等^[2]。由于大部分黄土固化剂属于无机胶结材料, 它们固化后虽能形成具有一定强度的稳定黄土, 低廉的价格和相对稳定的性能而得到了广泛地研究和应用, 但这些无机硬化剂常常会引起黄土结构的破坏, 且加工时能耗大, 对环境污染大, 另外, 有的化学材料成本很高, 有的用量较大, 所以在实际工程中应用受到限制。为此, 新型的对环境无影响的水溶性高分子固化剂引起了人们广泛的重视^[3]。SH 水溶性高分子固化材料是固化行列中的新兴产品, 由兰州大学采用高分子合成方法获得, 其

收稿日期: 2003-08-26

修改稿收到日期: 2003-10-15

基金项目: 国家“863”计划资助项目(No. 2001AA322010)。

作者简介: 王银梅, 女, 1965年生, 博士, 从事岩土工程教学及科研工作。

亲水性强, 在水中能无限溶解而形成溶液。SH 在常温下固化, 与黄土相结合产生物理化学作用(吸附、架桥、絮凝)和化学作用(键合、缔合、离子交换), SH 与黄土颗粒发生交联, 形成具有膜性能的网络。这种网络具有刚性、弹性、亲水性和透气性, 因此它具有优良的耐老化、耐高、低温性能、抗崩解性能。

SH 液的使用非常方便, 施工时, 可保持其它施工工艺不变, 只需将其按需要用清水稀释至一定浓度后均匀洒于翻松的黄土基层表面, 碾压后即可满足工程要求。通常 SH 用量少, 成本低(为低成本制备技术), 且为生态环境材料。

本文对 SH 固化黄土的力学性能进行了较系统的试验研究, 并与水泥黄土作了对比, 结果可为推广应用 SH 这种新型材料提供实用性, 因而具有重要的实际意义。

2 试验方法

2.1 试件配料

选用兰州地区某黄土, 其主要性质见表 1, 其配料是 6%浓度的新型高分子固化材料 SH。

表 1 试验用黄土的性质
Table 1 The properties of experimental loess

土样名称	含水量/%	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	液限/%	塑限/%	液限指数
黄土	8.8	1.30	31.7	20.2	1.32

2.2 试件制备与养护

先将试验用黄土风干, 粉碎过 0.5 mm 筛, 掺入不同量的 SH 及空白水样, 拌合均匀, 浸润 1 d 后用小型击实试验方法, 按设计干密度在 $7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm}$ 的模具内进行成型, 脱模。所有试件都置于室内通风干燥处至龄期结束。

3 试验结果及分析

3.1 无侧限抗压强度试验

固化试样的抗压强度是其力学性能指标的集中反映, 它不仅与试样的其它物理力学性质密切相关, 且与固化材料的性质有关。可以用 WE-30 型液压式万能材料试验机测试固化试件的变形和无侧限抗压强度。

(1) 强度特征

设计固化土的干密度为 1.6 g/cm^3 , 分别掺加不同配比 SH 的固化试样的无侧限抗压强度试验结果如表 2 示。可以看出, 素黄土的强度仅为 2.29 MPa, 掺入少量的 SH 后, 其强度明显提高。

表 2 试样 60 d 的抗压强度
Table 2 Compressive strength of 60 day with SH

掺量与结果	SH 掺量/mL			
	0	60	100	120
SH 固含量掺量/%	0	0.28	0.35	0.42
抗压强度/MPa	2.29	2.60	3.02	5.04

为了达到既能保证加固黄土的质量, 又能降低工程造价的目的, 有必要求得新型固化材料掺量与固化土强度之间的关系。试验中 0.6%SH 的掺量分别为 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130 mL, 对应的换算为 SH 固含量占黄土质量的比例分别为 0.63%, 0.73%, 0.83%, 0.94%, 1.04%, 1.15%, 1.25%, 1.35%, 固化土的干密度为 1.60 g/cm^3 。测定结果如图 1, 2 所示。

图 1, 图 2 说明, 用 SH 固化黄土, 虽用量很小, 干密度也不大, 而强度却较高。用最小二乘法对强度-掺量作回归得到两者的相互关系, 其相关系数为 0.98。由此可知, SH 的掺量与固化黄土的强度之间存在着较好的相关性。因此, 在实际施工前, 只要有足够时间, 事先取实际土样, 作一定数量掺有给定配比的新型固化材的固化土强度试验, 便可得到加固黄土的强度-掺量经验式。施工中可根据工程要求的加固土强度, 计算出所需的 SH 掺量, 这对设计和施工是很有益的。

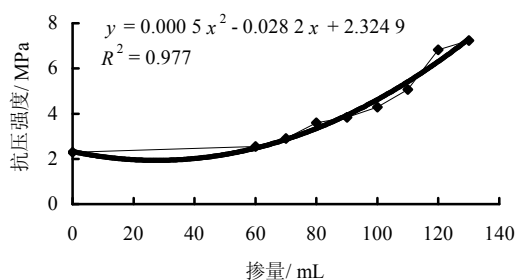


图 1 固化黄土强度与 SH 掺量的关系

Fig. 1 Relation between compressive strength of SH-stabilized loess and SH content

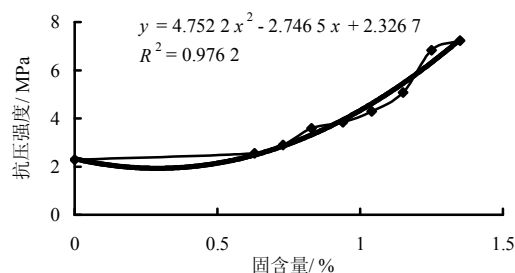


图 2 固化黄土强度与 SH 固含量的关系

Fig. 2 Relation between compressive strength of SH-stabilized loess and SH solid content

(2) 黄土试件的压缩变形特征

固化黄土试件在压力机上加压, 用变形计测记不同应力作用下试件的变形值, 绘出应力-变形曲线如图 3 示。图 3 表明, 固化黄土在小变形时, 两者为线弹性的关系, 随变形增加, 表现为非线性的关系, 即近似为双曲线的形状。

当固化黄土呈压缩破坏时, 则破坏应变成成为衡量 SH 固化黄土变形特性的重要指标之一。破坏应变得大, 材料可视为韧性, 反之, 破坏变形小则材料常视为韧性较好, 工程上往往以韧性材料为理想, 图 4 给出了一个抗压强度与破坏应关系的例子。由图 4 可见, 不同掺入量的试样破坏时轴向应变约在 0.71 %~2.5 % 之间, 并且, 具有随 SH 掺量及抗压强度增大而增大的趋势。

SH 固化风砂土的应力-应变曲线的非线性使得其模量不是一个常数, 而是随应力范围变化而变的。取应力从 0 至抗压强度一半 ($R/2$) 处曲线的斜率作为加固后的平均变形模量 E_{50} , 也称变形系数, 即 $E_{50} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon = R / 2\varepsilon_{0.5}$ ($\varepsilon_{0.5}$ 为 $R/2$ 时对应的应变值), 经计算点绘成图 5。图 5 中抗压强度与变形系数之间基本上呈正比关系。

从破坏模式角度来看, 随着 SH 掺量的增加, 逐渐从脆性破坏变为塑性破坏。

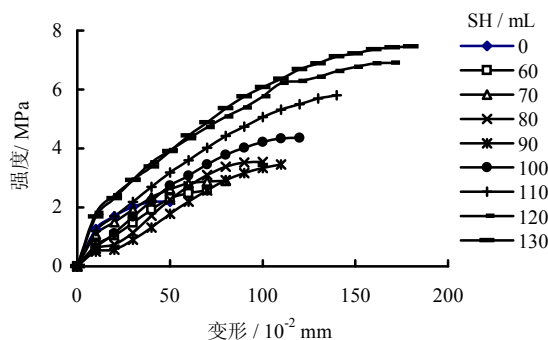


图 3 固化黄土的应力-变形曲线

Fig. 3 Stress-deformation curve of SH-stabilized loess

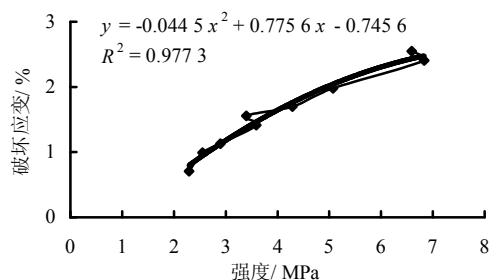


图 4 固化黄土的破坏应变与抗压强度

Fig. 4 Collapsing strain-compressive strength of loess stabilized with SH

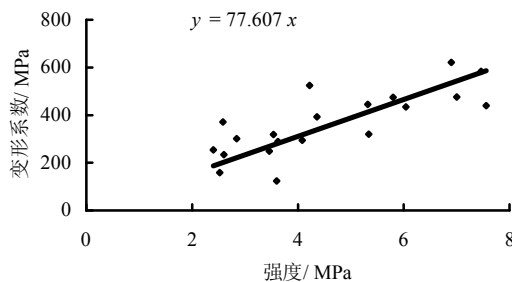


图 5 变形系数与抗压强度相互关系

Fig.5 Relation between deformation coefficient and compressive strength

3.2 固化黄土的崩解试验

将黄土与 80, 120 mL 的 SH 混合成型, 在室内自然风干 28 d, 然后将试样置于盛有自来水的容器中 (水完全淹没土样), 观察试样在水中自然崩解的情况, 并记录其崩解特征见表 3。

表 3 SH 固化黄土试件的崩解结果

Table 3 Disintegration result of SH-stabilized loess

SH 掺量 / mL	崩解特征			
	浸水开始	5/min	30/min	7/d
80	吸水发泡, 和缓, 持续时间短	表面浮有气泡	基本无变化	不崩解
120	几乎无气泡泛出	土样表面有极少的气泡	基本无变化	不崩解

由此可以看出, 掺入 80 或 120 mL 的 SH 的固化黄土, 试样刚浸水时, 只有微量气泡冒出, 约 30 min 后就没有变化了, 浸水一周不崩解, 6 个月后试样完好, 这说明 SH 固化黄土的抗水性能很好。

3.3 固化黄土的抗冻试验

SH 固化黄土的抗冻性能是评价其抵抗环境中冻融交变产生破坏的能力, 为评价固化黄土耐久性的关键指标。本次试验采用与混凝土抗冻试验基本相同的方法。试件仍采用立方体, 在试件到达试验龄期的前 4 d, 将试件泡水, 浸泡 4 d 后开始放入温度为 $-17 \sim -20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 的冰箱中冷冻 4 h, 然后, 取出放在 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 的室水中融化 4 h, 此为一次冻融循环。至规定的冻融循环次数后, 将试样放入 $100^\circ\text{C} \sim 105^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干, 测其干抗压强度。

SH 固化黄土试块的抗压强度为 5.18 MPa, 经 25 次冻融循环后强度降为 4.36 MPa, 25 次冻融循环后, 强度损失率为 15.7 %, 抗冻性较好。

4 水泥黄土的工程力学性能

为评价 SH 固化黄土的效果，将水泥加固黄土的力学性能结果与之对比。

水泥黄土是机械和化学双重作用加固黄土。1987 年兰州大学张咸恭教授得到了国家自然科学基金资助开展了系统的水泥黄土研究，发现通过加水水泥而形成的水泥黄土具有一系列改良的工程性质。

(1) 水泥黄土的强度

水泥黄土的强度受多种因素制约。图 6，图 7 分别表示水泥掺量及干密度对固化黄土1，黄土2 强度的影响。从图中可以看出，水泥黄土的强度普遍不太高。如以图 6 中水泥掺量 10 %时，干密度为 1.70 g/cm³，以龄期 28 d 的水泥黄土 1 为例，强度仅为 1.45 MPa。水泥掺量越大，干密度越大，水泥黄土的强度越高。由于经济及技术原因，施工中若靠无限增大密度或水泥掺量来提高水泥黄土强度是不现实的。

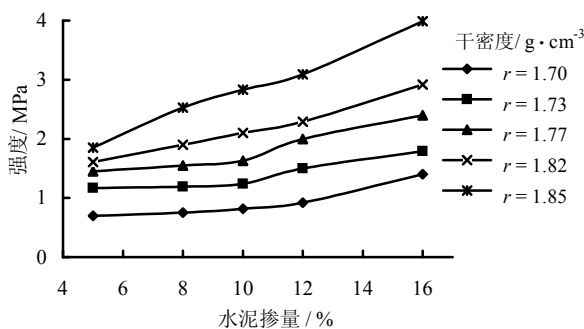


图 6 固化黄土 1 强度与水泥掺量、干密度的关系

Fig. 6 Relation between strength-cement content and dry density of loess-1 stabilized with cement

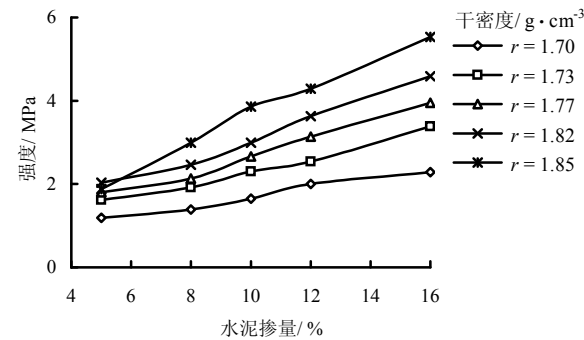


图 7 固化黄土 2 强度与水泥掺量、干密度的关系

Fig. 7 Relation between strength-cement content and dry density of loess-2 stabilized with cement

把两种材料加固黄土强度的简单对比列入表 4，可以看出，在相同加固用量的水平下，SH 加固黄土可获得比较大干密度的水泥黄土更大的强度。由于 SH 固化黄土在较小的压实功能，实际中只需轻型碾压即可满足工程要求，技术比较简单，且 SH 材料成本又较低(原材料为化工废料，固含量很少)，所以 SH 固化黄土显示了一定的优越性。

表 4 两种材料加固黄土的比较

Table 4 Comparison between loess stabilized with SH and cement

用量及结果	SH 用量/mL						干密度 /g·cm ⁻³
	30	50	60	70	90	115	
6 %SH 用量/%	5	8	10	12	16	20	1.60
SH 固含量/%	0.31	0.52	0.63	0.73	0.94	1.20	
SH 固化黄土强度 /MPa	2.0	2.22	2.55	2.90	3.84	6.0	
水泥用量/%	5	8	10	12	16	20	
水泥黄土强度 /MPa	1.19	1.39	1.65	2.0	2.29	2.80	1.70
	1.88	2.99	3.86	4.29	5.53	6.80	1.85

(2) 水泥黄土的抗冻能力

水泥黄土的抗冻能力是评价水泥黄土材料耐久性的关键指标。试验用干密度为 1.77 g/cm³，水泥掺量 10 %的水泥黄土，结果显示，经 25 次冻融循环，强度损失达 32.78 %，抗冻性较差^[4]。

(3) 变形特征

根据试验而得的水泥黄土的应力-应变关系也是非线性的。从破坏模式角度看，随着围压和制样含水量的增大，水泥黄土的破坏模式逐渐从脆性转变为塑性破坏，而随着水泥掺量的增加，破坏模式又逐渐从塑性变为脆性破坏，即应力-应变关系逐渐从硬化型变为软化型。水泥掺量对水泥黄土破坏变形的幅值影响不大^[5]。

5 SH 对黄土固化的机理浅析

新型高分子固化材料SH与水泥相比具有较为优良的固化性能，已通过试验证实，之所以如此，是由于SH和水泥加固黄土的机理不同。

SH为水溶性高分子，其大分子链上有羧基，羟基等亲水基团，其主链为疏水性C-C键相联的大分子链。

SH与黄土拌合均匀，并轻微压实后，高分子链就将土颗粒一一搭接，同时高分子链间的交联，最终使整个土体成为一空间网状结构，起到加固土、改善土耐久性的作用。

水泥黄土强度增长的基本原理是, 基于水泥和黄土间的物理-化学反应, 不仅存在水泥的水化硬化, 而且伴随着土体与水泥水化物的相互作用。水泥黄土强度的构成主要有 4 个层次, 即黄土的固有结构, 物理改良, 水泥硬化, 硬凝反应, 而水泥水化所产生的 CSH 等水化物的胶结作用是水泥黄土强度的主要来源^[6]。

SH 与黄土之间推测可能产生了物理化学作用(吸附、架桥、絮凝)和化学作用(键合、缔合、离子交换), 其间更多的事实虽仍需进一步证实, 但可以肯定的是 SH 充分利用了胶体间的电性吸引力和高分子长链的搭接、缠绕作用来增强土体强度。由于以上作用在水中的不可逆性, 因此, SH 加固土无论是水稳定性, 还是冻稳定性, 显示出的品质都比水泥黄土要好些。

6 结 语

SH 作为新型的固化材料, 其固化黄土研究有待进一步深化。综合有关资料及 SH 固化黄土力学性能进行大量的试验研究, 取得了以下认识:

(1) SH 用量很少, 但在自然条件下养护较长时间后强度高、耐水耐低温性好。抗压强度在试验剂量范围内随 SH 掺量的增加非线性增大; 试样长期浸水后不崩解; 能抗冻融 25 次循环。

(2) SH 固化黄土呈压缩破坏时, 随着 SH 掺量的增加, 破坏应变增大, 韧性增强, 破坏模式逐渐由脆性转为塑性。

(3) SH 为液体固化剂, 以水溶液形式加入黄土中, 施工工艺简单、方便, 可以有效解决拌和不均匀的问题。SH 掺量少, 价格也便宜。

(4) 与水泥黄土对比, 水泥黄土用水泥量较大, 但强度较低; 应力-应变关系也为非线性, 但随着水泥掺量的增大, 破坏逐渐由塑性转为脆性。水泥黄土抗冻融能力较差。

从加固效果及整体分析, SH 固化黄土力学性

能优于水泥黄土, 是新型的有发展前途的黄土固化材料。

参 考 文 献

- [1] 黄土地区路基固化技术研究报告[R]. 甘肃省交通厅, 长安大学, 2002.
- [2] [日]松尾新一朗编, 孙明漳, 梁清彦译. 土质加固方法手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [3] 刘瑾, 张峰君, 陈晓明, 等. 新型水溶性高分子土体固化剂的性能及机理研究[J]. 材料科学与工程, 2001, 19(4): 62—65.
LIU Jin, ZHANG Feng-jun, CHEN Xiao-ming, et al. Study on the soil hardening properties and mechanism of a new water soluble polymeric soil hardening agent[J]. **Materials Science & Engineering** 2001, 19(4): 62—65.
- [4] 王银梅. 水泥黄土工程性能的试验研究[硕士论文D]. 甘肃: 兰州大学, 1989.
WANG Yin-mei. Experimental study on engineering properties of loess-cement. [paper of master degree D]. Gansu. Lanzhou University, 1989.
- [5] 张军丽, 刘保健. 水泥黄土的力学特性试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(2): 6—9.
ZHANG Jun-li, LIU Bao-jian. The experiment research on the characteristics of cement loess[J]. **Journal of Xian'an Highway University**, 1999, 19(2): 6—9.
- [6] 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 62—68.
HUANG Xing, ZHOU Guo-jun. Hardening mechanism of cement-stabilized soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**. 1994, 16(1): 62—68.